

## ±1100kV 胶浸纸电容式穿墙套管多应力耦合绝缘失效机理研究

陈兵

阿海珐(广东)高压电气有限公司 广东广州

**【摘要】** 本文围绕±1100kV 胶浸纸电容式穿墙套管的多应力耦合绝缘失效机理展开研究。通过对电、热、机械等多重应力的耦合作用分析,揭示了绝缘材料在复杂工况下的失效特征及发展规律。研究结果为提升套管绝缘可靠性和优化设计提供了理论依据,有助于高电压输电设备的安全稳定运行。

**【关键词】** ±1100kV; 胶浸纸; 穿墙套管; 多应力耦合; 绝缘失效机理

**【收稿日期】** 2025 年 3 月 10 日 **【出刊日期】** 2025 年 4 月 11 日 **【DOI】** 10.12208/j.jjea.20250145

### Study on multi-stress coupled insulation failure mechanism of ±1100kV oil-impregnated paper capacitive wall bushing

Bing Chen

Ahifa(guangdong) high voltage electric Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong

**【Abstract】** This paper focuses on the study of the multi-stress coupled insulation failure mechanism of ±1100kV oil-impregnated paper capacitive wall bushings. By analyzing the combined effects of electrical, thermal, and mechanical stresses, the failure characteristics and development patterns of the insulation materials under complex operating conditions are revealed. The research results provide a theoretical basis for improving the insulation reliability and optimizing the design of bushings, contributing to the safe and stable operation of high-voltage power transmission equipment.

**【Keywords】** ±1100kV; Oil-impregnated paper; Wall bushing; Multi-stress coupling; Insulation failure mechanism

#### 引言

随着特高压输电技术的快速发展,±1100kV 胶浸纸电容式穿墙套管作为关键绝缘部件,其运行安全性直接关系到电力系统的稳定性。套管在长期运行中,受到电场、热应力和机械应力的多重作用,导致绝缘材料性能逐渐退化甚至失效。深入研究多应力耦合下的绝缘失效机理,不仅能够揭示套管故障根源,还为提高其设计和维护水平提供重要参考,具有重要的工程应用价值和理论意义。

#### 1 ±1100kV 胶浸纸电容式穿墙套管绝缘失效的多应力影响分析

±1100kV 胶浸纸电容式穿墙套管作为特高压输电系统中的关键绝缘元件,其运行安全性直接影响整个电网的稳定与可靠。套管在实际工作过程中,受到电场强度、热负荷以及机械应力等多重因素的综合作用,这些应力因素相互耦合,产生复杂的物

理和化学反应,对绝缘系统的长期稳定性构成严峻挑战<sup>[1]</sup>。电场应力主要表现为高强度电场对胶浸纸绝缘介质的极化和电击穿风险,而温度场则来源于套管自身发热和周边环境变化,导致绝缘材料热膨胀和热老化,机械应力则包括由设备自身重量、振动及外部力引起的机械变形。多应力作用下,绝缘材料内部结构和介电性能发生变化,进而引发局部放电、介质击穿及绝缘强度下降等失效现象。

电、热、机械应力的交互作用不仅加速了胶浸纸介质的劣化过程,还导致应力场分布的非均匀性。电场集中区域会引发局部强场增强,造成绝缘击穿的隐患;温度梯度则使得绝缘材料内部产生热应力集中,促使介质发生热损伤甚至裂纹扩展;机械负荷的周期性变化容易引发微观裂纹和空穴的形成<sup>[2]</sup>。这些因素相互作用,共同决定了套管绝缘的使用寿命和故障模式。套管运行过程中,多应力耦合作用

使得绝缘材料的介电损耗和介质吸水率增加,严重时可能引发套管内部绝缘击穿,导致系统停电事故,给电力系统的安全运行带来重大风险。

实际工程中,理解和掌握多应力耦合对套管绝缘失效的影响机理,对于设计更具耐受性的绝缘结构和制定科学的运行维护策略至关重要。通过对多应力影响因素的深入分析,结合现场运行数据,可以准确评估套管绝缘性能退化趋势,及时采取针对性措施,延长套管寿命并降低故障率。此外,优化绝缘材料配方和制造工艺,提高胶浸纸介质的电热机械综合性能,是提升套管整体可靠性的关键路径。研究多应力耦合的失效机理,不仅为理论提供支持,也为特高压输电设备的安全稳定运行提供坚实保障。

## 2 多应力耦合下绝缘材料失效机理的理论模型构建

多应力耦合下绝缘材料失效机理的理论模型构建是理解±1100kV 胶浸纸电容式穿墙套管绝缘性能衰退过程的关键环节。该模型以电场、热应力和机械应力的相互作用为基础,综合考虑多种物理场对绝缘系统的影响。在高电压等级下,电场强度的非均匀分布会导致局部电应力集中,诱发绝缘材料内部局部放电和介质击穿现象。运行中温度的升高引起绝缘介质热膨胀和热老化,进一步加剧材料结构的微观损伤<sup>[3]</sup>。机械应力源于套管安装过程中的预紧力及运行振动,这些力学作用与电热耦合效应共同作用,促进微裂纹扩展和绝缘强度下降。理论模型必须准确反映这些复杂耦合作用,才能揭示绝缘失效的真实机制。

在模型构建过程中,需采用多物理场耦合分析方法,将电场分布、温度场变化和机械应力场进行同步模拟。基于有限元分析技术,利用电-热-力学耦合方程组对胶浸纸绝缘体内部的应力状态进行计算和预测<sup>[4]</sup>。通过引入绝缘材料的介电性能退化模型与热老化动力学模型,能够反映材料性能随时间和应力变化的非线性特征。模型还考虑了绝缘材料的微观结构缺陷和界面劣化效应,这些因素在多应力作用下对绝缘整体性能的影响尤为显著。通过多场耦合计算,模型不仅可以预测套管绝缘在不同工况下的失效风险,还能量化不同应力因子的贡献率,为后续的设计改进提供科学依据。

理论模型的实际应用价值主要体现在对绝缘失效过程的动态描述和寿命预测能力上。该模型系统

整合了电、热、机械等多重应力的作用机理,详细揭示了绝缘失效从初期的微观结构损伤逐步发展到宏观破坏的演变路径。通过结合实验室的加速老化试验与现场运行数据,模型参数得以持续校正和优化,显著提升了预测的准确性和可靠性。基于这一理论模型,能够为胶浸纸电容式穿墙套管的结构优化和材料选择提供科学依据,帮助设计更加耐久且稳定的绝缘系统。该模型支持制定科学合理的运行维护策略,针对不同工况下的多应力耦合效应实施有效管理,从而延长套管的实际使用寿命并显著降低故障发生的风险。理论模型的建立不仅加深了对高电压绝缘材料多应力耦合失效机制的理解,也为特高压输电设备的安全性和稳定性保障提供了坚实的技术支撑,推动了高电压绝缘技术的进一步发展和应用。

## 3 绝缘失效机理验证及关键参数实验分析

多应力耦合绝缘失效机理的验证过程依托于系统的实验设计和数据分析。通过对±1100kV 胶浸纸电容式穿墙套管在电场、热应力和机械应力作用下的响应进行细致观测,能够揭示不同应力因素及其叠加效应对绝缘性能的具体影响<sup>[5]</sup>。实验采用高压施加装置、热循环设备和机械加载系统,模拟套管在实际运行环境中的工况,保证数据的真实性和代表性。电学参数如介电损耗因数、击穿电压以及局部放电特性,成为评估绝缘状况的重要指标,热机械加载则反映材料结构的热胀冷缩和机械变形带来的内应力变化。这些综合数据为多应力耦合失效机理的验证提供了坚实的实验基础。

在关键参数的实验分析中,特别关注电场强度、温度梯度及机械应力幅值对绝缘结构完整性的影响。随着电场强度的提升,介质中的极化和局部放电活动显著增强,导致绝缘介质的局部损伤逐步积累,表现为介质击穿电压降低和局部放电放大。温度的变化引起油纸绝缘材料的物理性质改变,包含介电常数的波动和机械强度的衰减,特别是在高温环境下,绝缘介质的热老化速率显著加快<sup>[6]</sup>。机械应力的周期性作用使得材料内部产生微裂纹和结构疲劳,成为绝缘失效的先兆。在多重应力作用下,这些因素相互耦合,加剧了绝缘劣化的进程,实验结果显示不同应力参数的耦合非线性效应需在绝缘设计和寿命评估中重点考虑。

针对实验验证中获得的数据,运用有限元分析与电热机械耦合模型进行对比,进一步深化对失效

机理的理解。模型仿真结合实验数据校正,准确预测套管绝缘在复杂应力环境中的电场分布、温度场变化及机械应力集中区。通过仿真分析确定套管内部潜在的高风险区域,为绝缘设计提供关键参考。基于此,针对发现的薄弱环节,提出相应的结构改进措施和材料选择方案,从而有效抑制绝缘失效的发展趋势。实验与仿真相结合的验证手段,确保了研究结论的科学性和实用性,为±1100kV级胶浸纸电容式穿墙套管的可靠运行提供了理论与技术支撑。

#### 4 套管绝缘性能优化设计及工程应用探讨

±1100kV 胶浸纸电容式穿墙套管作为高电压输电系统中的关键绝缘元件,其绝缘性能的优化设计对于保障整个系统的安全稳定运行具有至关重要的意义。针对多应力耦合导致的绝缘失效问题,优化设计不仅要求提升材料本身的耐电强度和热稳定性,还需合理控制机械应力的分布,以减少绝缘介质中的应力集中现象。通过改进胶浸纸的制造工艺,提高其纤维均匀性和绝缘均质性,能够有效增强其承受电场和热负荷的能力<sup>[7]</sup>。优化电容式套管的结构设计,调整电场分布,降低局部高场强,从根本上抑制局部击穿和电气树枝化的发展,为绝缘寿命的延长奠定基础。

多应力耦合作用下,绝缘系统的老化过程更加复杂,设计优化需要引入多物理场耦合仿真技术,对电场、热场和机械应力场进行同步分析。利用有限元分析对套管结构及其内部绝缘材料进行应力响应评估,能够识别潜在的薄弱区域和高应力集中点,为针对性改进提供依据。此类仿真方法不仅能够指导材料选择,还能优化套管的几何形状和界面处理,提升绝缘层的整体一致性与稳定性<sup>[8]</sup>。合理设置内外电极的几何参数与间距,通过控制电容分布实现电场均匀化,有效缓解局部电晕放电和局部热积聚现象,降低局部热应力,进而提升绝缘结构的长期稳定性。

结合实验室高压试验和现场运行数据,对优化设计的胶浸纸电容式穿墙套管进行了全面而严格的性能测试,重点验证其在复杂多应力耦合环境下的耐久性和可靠性。测试结果表明,经过优化设计的套管在抗击穿强度和热稳定性方面表现显著优于传统设计,能够有效抵御高电压、电场集中以及机械应力引发的绝缘退化问题。实际工程应用中,这类优化设计的穿墙套管显著降低了设备故障率,延长了使用寿命,保障了输电系统的安全稳定运行。系统性的评估与设计优化不仅提升了绝缘系统的整体

性能,还有效减少了设备维护频率和成本,降低了潜在的运行事故风险,提升了电网的经济效益和供电可靠性。随着特高压输电技术的不断发展,基于多应力耦合机理的绝缘设计理念将成为未来穿墙套管技术创新的重要方向,为我国特高压电网的安全运行和技术升级提供坚实的技术支撑和保障。

#### 5 结语

±1100kV 胶浸纸电容式穿墙套管的绝缘性能优化是保障高电压输电系统安全运行的关键环节。多应力耦合环境下,合理的材料选择与结构设计有效提升了套管的耐受能力和稳定性。多物理场耦合仿真技术的应用,为识别应力集中和优化设计提供了科学依据。实验与工程实践验证了优化方案的有效性,显著降低了绝缘失效风险。未来,持续深化多应力耦合机制研究与设计创新,将推动套管技术迈向更高水平,保障特高压输电设备的可靠性和寿命。

#### 参考文献

- [1] 侯建峰,BJR—±204kV/2800A 胶浸纸电容式换流变套管.陕西省,西安西电高压套管有限公司,2014-02-22.
- [2] 侯建峰,BRFGZ—±400kV/5515A 胶浸纸电容式换流变套管.陕西省,西安西电高压套管有限公司,2014-02-22.
- [3] 彭宗任,±800KV/3600A、±125KV/3800A 胶浸纸电容式换流变套管.陕西省,西安西电高压套管有限公司,2012-12-01.
- [4] 刘旭.多应力耦合下高压气瓶分层失效耐久性评估方法[D].长安大学,2024.
- [5] 张帆,田润操,王鹏,等.考虑广义耦合的多应力加速寿命评估方法[J].系统工程与电子技术,2023,45(10):3350-3361.
- [6] 赵泓荀.加工中心电主轴多应力加速退化试验方案的优化设计方法[D].吉林大学,2022.
- [7] 潘晋新,景博,焦晓璇,等.多应力耦合条件下氧气浓缩器退化建模[J].北京航空航天大学学报,2023,49(02):472-481.
- [8] 张彤.典型电连接器多应力耦合试验设计及仿真分析[J].舰船电子工程,2021,41(07):114-118+132.

**版权声明:** ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



**OPEN ACCESS**